

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02657

研究課題名（和文）データセントリック手法による光応用情報技術の高度化

研究課題名（英文）Advancement of optical applied information technology by data-centric method

研究代表者

谷田 純（Tanida, Jun）

大阪大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：00183070

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、データセントリック手法に基づく光応用情報技術を高度化させることを目的として実施した。(1)データ生成システムでは、フェルスター共鳴エネルギー移動（FRET）に着目し、模擬光学システムの技術開発に取り組んだ。選択発光可能な蛍光光源と非線形光学応答シミュレータを作成した。(2)デュアル評価システムでは、機械学習以外のイメージング手法の技術開発を進め、分光スペckル相関イメージング、符号化開口ブラインドデコンボリューション、インコヒーレント光位相共役を考案した。(3)ハイブリッド情報システム構成論として、包絡分析法の適用とサイバーフィジカル計測手法の概念を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の人工知能がもたらす能力や可能性は、科学技術における方法論の変革を余儀なくする。本研究は、機械学習を利用した新しいイメージング技術と物理現象に立脚した旧来のイメージング技術を連携させる上で有用な手法や要素技術を提供する。イメージングや計測は物理的な裏付けがあってこそ意味をもち、情報処理と光学処理を並列に動作させるデュアル評価システムの考え方は今後ますます重要になってくる。産業分野、医療分野、学術分野において、信頼できる人工知能システムを実現する上で、本研究は有意義なものと考えている。

研究成果の概要（英文）：This research was carried out for the purpose of advancing the applied optical information technology based on the data-centric method. (1) In the data generation system, we focused on Forster Resonance Energy Transfer (FRET) and worked on the technical development of a simulated optical system. A fluorescent light source capable of selective emission and a nonlinear optical response simulator were constructed. (2) For the dual evaluation system, we have developed imaging techniques other than machine learning, and devised spectral speckle correlation imaging, coded aperture blind deconvolution, and incoherent optical phase conjugation. (3) As a hybrid information system configuration theory, the application of the data envelope analysis and the concept of the cyber-physical measurement method were examined.

研究分野：情報フォトンクス

キーワード：機械学習 散乱イメージング 光波センシング データセントリック手法 ハイブリッドシステム

1. 研究開始当初の背景

深層ニューラルネットワークに代表される人工知能がもたらす能力やそこから予測される可能性は、科学技術における方法論の変革を余儀なくさせている。光応用技術分野においても同様であり、人工知能の中核技術である機械学習の適用により、強散乱媒質越しのイメージングや回折限界を大きく超える回折イメージングなど既存技術では実現困難な成果が次々に報告されている。本研究では、物理過程から得られるデータ群によりシステム特性を学習し、その物理過程を数理モデルとして活用するデータセントリック手法に注目した。

これまでの研究成果より、光応用情報技術におけるデータセントリック手法の有用性は明らかである。しかし同時に、学習データ依存性と結果説明性に関する問題が顕在化している。そこで、本研究では、光応用情報技術における実現手法の開発を通して、データセントリック手法に対する理解を深め、科学技術分野における有効な解決手段として活用とそれに適した利用形態を探索することをめざした。

2. 研究の目的

本研究は、これまでに得られた研究成果に立脚しデータセントリック手法に基づく光応用情報技術を高度化させることを目的とする。

まず、学習データに関する問題を取り上げ、対象システムに適した効率的なデータ生成技術の開発をめざす。学習用データを準備するため、モンテカルロ法による物理過程シミュレータと模擬光学システムによる光コンピューティング技術を用いたデータ生成手法の開発をめざし、その技術基盤を構築する。

また、これまでに得られた機械学習に基づく散乱イメージング、回折イメージング、計算機ホログラム生成、波面センシングなどのセンシング/イメージング技術の高性能化を進める。特に、散乱光の計測や制御では、従来、光学系のサイズ、複雑さ、価格が問題であった。そこで、情報科学技術の積極利用により、これらの課題解決に取り組む。

これらの研究を通して、現代的な光応用情報システム構成論を確立するために、データセントリック手法の一般的な光応用情報システムへの拡張を試みる。

3. 研究の方法

研究目的を達成するため、(1) データ生成システムと(2)デュアル評価システムの二つのシステムを並行して開発した。(1)データ生成では、種類が豊富であり、様々な物理現象を発現する蛍光、および、それらの間で生じるフェルスター共鳴エネルギー移動 (FRET) に着目し、模擬光学システムの技術開発に取り組んだ。(2)デュアル評価システムでは、機械学習以外のイメージング手法の充実が不可欠であり、それらの技術開発を優先的に進めた。これらの研究を通して得られた知見をもとに、(3)ハイブリッド情報システム構成論を検討した。

(1) データ生成システム

① 選択発光可能な蛍光光源

模擬光学系においてさまざまなデータを生成するためには、散乱体を模した光学系中に微小光源を適切に配置し、その発光を制御することが必要である。そこで、FRET 現象を利用することにより、励起波長によって同一蛍光波長の蛍光体を選択的に発光可能な蛍光システムを検討した。FRET はナノメートルスケールの現象であり、実装には、複数の蛍光体の精密配置が可能な DNA 自己組織化を用いる。

② 非線形光学応答

データ生成のための模擬光学系におけるプロセスとして非線形性の発現は不可欠な要素である。そこで、多数の蛍光体がナノメートルスケールで隣接するときに現れるエネルギー移動のネットワークに潜在する非線形光学応答について検討した。その特性を把握することで、複雑な物理過程への対応が可能になると考えられる。レート方程式に基づくシミュレータを作成し、入出力応答を調査・議論した。

(2) デュアル評価システム

① 分光スペckル相関イメージング

散乱体背後を可視化する手段として、スペckル相関イメージングが知られている。スペckル相関イメージングは、散乱体背後への参照光源の設置、事前の散乱応答計測、干渉計測が不要であり、簡素な光学系によるシングルショット非侵襲イメージングが可能である。本研究では、散乱体を通して得られるスペckルの波長依存性を利用し、これまで二次元空間計測に限定されていたスペckル相関イメージングを分光イメージングに拡張した。

本手法では、時空間的なインコヒーレント光を用いて散乱体背後の対象を照明し、散乱体を通してスペckル画像を一枚撮影する。得られたスペckル画像に対し、拡大縮小を伴う自己相関

演算を行う。自己相関演算結果に三次元位相回復を適用し、分光情報を回復する。

② 符号化開口を利用したシングルショットブラインドデコンボリューション

シフト不変性を有する劣化を経た撮影画像から対象を復元する手法として、デコンボリューションが知られている。しかし、デコンボリューションでは劣化関数の事前計測を前提にしており、実用的ではない。撮影画像から対象と劣化関数を同時に復元する手段として、ブラインドデコンボリューションがある。ただし、ブラインドデコンボリューションでは、不良設定な逆問題を解く必要があり、対象と劣化関数の安定した復元は難しい。

本研究では、符号化開口を結像光学系の瞳面に挿入し、劣化伝達関数の未知数削減を図った。本手法では符号化開口を通して劣化画像を一枚撮影する。位相回復を伴う再構成処理を適用することで、対象を安定に推定できる。また、本研究では、インコヒーレント光を用いているが、コヒーレント光への展開も進めている。

③ インコヒーレント光位相共役

光位相共役は、散乱光を散乱体へ逆入射することで、散乱体背後において対象像を光学再生する。従来の光位相共役は、コヒーレント光を用いて対象を照射し、散乱体を経た光波をデジタルホログラフィなどを通して波面計測する。その後、空間光変調器などを利用し、計測された散乱光波の位相共役波を散乱体へ入射し、散乱過程を逆再生する。そのため、計測過程、再生過程の両方にコヒーレント光が必要であり、光源、光学系の大型化、複雑化、高価格化が課題であった。

本研究では、時空間的にインコヒーレントな光を利用した光位相共役を実現した。散乱体背後の対象をインコヒーレント光で照明し、散乱体を通してスペckル画像を一枚撮影する。この際、干渉計測は用いない。インコヒーレント光を発するディスプレイに、撮影位置に合わせてスペckル画像を表示することで、コヒーレント光と同様に散乱過程が逆再生され、散乱体背後に対象像が光学再生される。ただし、インコヒーレント光の非負性に伴い、再生画像には大きな背景光が乗る。そこで、スペckル画像の画素をランダムにシャッフルした結果を同じディスプレイに表示し、散乱体背後に背景光を再生した。その後、計算機によりこの背景光を除去し、高コントラストな再生像を得た。

4. 研究成果

(1) データ生成システム

① 選択発光可能な蛍光光源

選択発光可能な蛍光システムを設計し、モンテカルロシミュレーションにより散乱体中における挙動を調べた。図1は異なる励起波長を用いた場合に、散乱により生じる同一蛍光波長の光分布の例である。選択発光機能により、励起波長によって分布が異なっている。完全に個別発光が可能な理想的な場合の光分布との二乗平均平方根誤差を評価したところ、選択性ありの場合(本手法)が0.04、選択性なしの場合が0.34であった。この選択発光の機能は実験的にも確認しており、本蛍光システムの有用性が示された。本手法は、光アドレッシング可能な蛍光光源として、散乱イメージングにおけるガイド星など、様々な応用展開が期待できる。

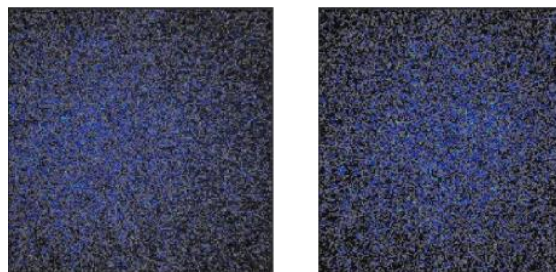


図1. 選択発光可能な蛍光システムにおける散乱光分布の例。

② 非線形光学応答

蛍光体の種類や配置、励起光強度などのパラメータを変化させ、蛍光体群のエネルギーダイナミクスなどの解析を行った。図2はある2つの時刻に対して、二次元に散布した蛍光体を持つエネルギーの分布をプロットしたものである。この結果などから、非線形応答が得られていることが確認できた。今後、所望の挙動を得るための蛍光体のパラメータ設定を見出すことで、散乱体中の光波の複雑な挙動に対応可能でコンパクトな模擬光学系の構築が期待される。

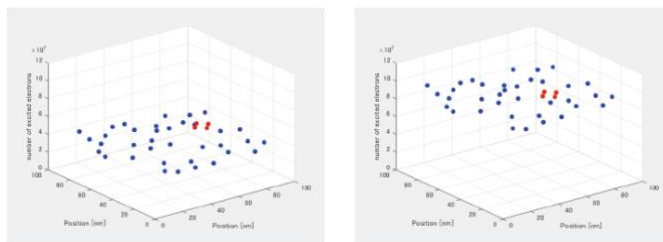


図2. 二つの時刻において各蛍光体を持つエネルギー。

(2) デュアル評価システム

① 分光スペckル相関イメージング

図3に示すように、散乱体背後にある520 nmと540 nmの波長を持つ点光源群の非侵襲可視化に成功した。本手法では簡易なパッシブ光学系によるシングルショット分光散乱イメージングが可能になる。そのため、従来の蛍光顕微鏡と組み合わせることで、生体組織の深部イメージングが実現できる。また、コンパクトな光学系、キャリブレーションフリーであることを踏まえ、分光イメージング手法としても、重要な成果である。

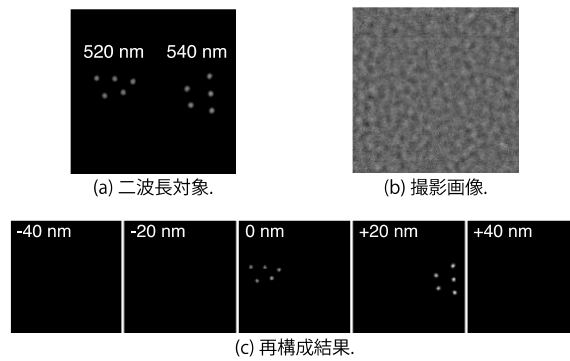


図3. 分光スペckル相関イメージング実験結果。

② 符号化開口を利用したシングルショットブラインドデコンボリューション

図4に示すように、点光源群から構成された対象を利用し、点光源群が視認できないほど強くデフォーカスを与えた撮影画像から、劣化関数に関する事前知識無しに、対象を復元した。天体観測や顕微鏡イメージングなどにおいて、ブラインドデコンボリューションの需要が高いが、その安定性が課題であった。本研究はこれらの分野への重要な貢献である。

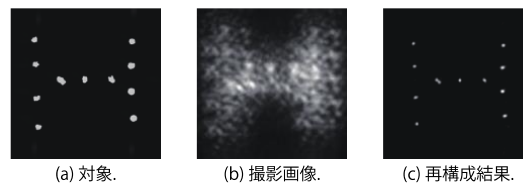


図4. 符号化開口を利用したシングルショットブラインドデコンボリューション実験結果。

③ インコヒーレント光位相共役

図5に示すように、インコヒーレント光により、散乱体背後の対象の光学像再生に成功した。本実証実験で用いた光学系は干渉計測などを伴わないため、従来のコヒーレント光を用いた光位相共役に比べて、大幅な小型化や簡易化が実現している。本研究は、セキュリティや自由空間光通信分野の基盤として期待される。



図5. インコヒーレント光位相共役。

(3) ハイブリッド情報システム構成論

① 包絡分析法に基づく情報システム評価

光/電子ハイブリッド情報システムの評価手法として、多入力多出力系のシステムの効率性を相対的に評価する包絡分析法(DEA)の適用を検討し、その有用性を確認した。DEAは多変量解析手法として経営分析分野で開発された手法であるが、一般的な情報システムの評価においても適用可能であることを見出し、本研究においてその有用性を明らかにした。

② サイバーフィジカル計測

サイバーフィジカルシステムとの関連性に着目し、光学系にかかるハードウェアを実世界、演算処理系をサイバースペースに、それぞれを対応させる新たな計測方法論を提案した。図6に示すように、量子ドット間エネルギー移動ネットワークに基づく蛍光応答信号から量子ドット群の相対位置を決定する課題に適用し、その有効性を確認した。

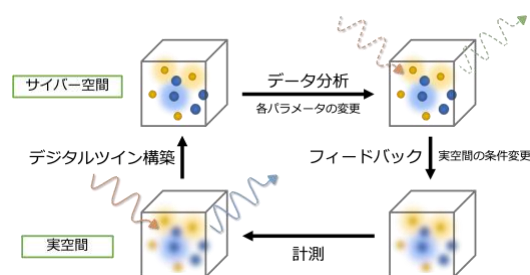


図6. サイバーフィジカル計測の概念。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Tanida Jun, Tsuchida Karin, Watanabe Ryo | 4. 巻 30 |
| 2. 論文標題 Digital-optical computational imaging capable of end-point logic operations | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Optics Express | 6. 最初と最後の頁 210 ~ 221 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.442985 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Horisaki Ryoichi, Aoki Takuro, Nishizaki Yohei, Rohm Andre, Chauvet Nicolas, Tanida Jun, Naruse Makoto | 4. 巻 47 |
| 2. 論文標題 Compressive propagation with coherence | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Optics Letters | 6. 最初と最後の頁 613 ~ 616 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.444772 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Yamazaki Kaoru, Horisaki Ryochi, Tanida Jun | 4. 巻 59 |
| 2. 論文標題 Imaging through scattering media based on semi-supervised learning | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Applied Optics | 6. 最初と最後の頁 9850 ~ 9854 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.402428 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Horisaki Ryoichi, Nishizaki Yohei, Kitaguchi Katsuhisa, Saito Mamoru, Tanida Jun | 4. 巻 60 |
| 2. 論文標題 Three-dimensional deeply generated holography [Invited] | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Applied Optics | 6. 最初と最後の頁 A323 ~ A328 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.404151 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Ehira Kunihiko, Horisaki Ryoichi, Nishizaki Yohei, Naruse Makoto, Tanida Jun | 4. 巻 60 |
| 2. 論文標題 Spectral speckle-correlation imaging | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Applied Optics | 6. 最初と最後の頁 2388 ~ 2392 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.418361 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 9件)

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 谷田 純 |
| 2. 発表標題 医療トランスデューサに資するフォトニック情報技術 |
| 3. 学会等名 第60回日本生体医工学会大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kunihiko Ehira, Ryoichi Horisaki, Yohei Nishizaki, Makoto Naruse, and Jun Tanida |
| 2. 発表標題 Single-shot spectral imaging by spectral speckle correlation |
| 3. 学会等名 JSAP-OSA Joint Symposia 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yusuke Ogura, Keita Hayashi, Suguru Shimomura, Jun Tanida |
| 2. 発表標題 Fluorescence tags using FRET networks and DNA structural change |
| 3. 学会等名 The 7th Biomedical Imaging and Sensing Conference (BISC2021) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yusuke Ogura, Jinya Inoue, Takahiro Nishimura, and Jun Tanida |
| 2. 発表標題 Construction of fluorescence tags using energy transfer networks on self-assembled DNA |
| 3. 学会等名 The 12th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication (ODF'20) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yusuke Ogura |
| 2. 発表標題 Holographic subdiffraction limit illumination and its application |
| 3. 学会等名 SPIE/COS Photonics Asia (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yusuke Ogura, Keita Hayashi, Suguru Shimomura, Takahiro Nishimura, Jun Tanida |
| 2. 発表標題 Fluorescence sensing based on dynamic FRET networks |
| 3. 学会等名 The 11th Japan-Korea Workshop on Digital Holography & Information Photonics (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 林 啓太, 小倉 裕介, 下村 優, 西村 隆宏, 谷田 純 |
| 2. 発表標題 FRETネットワークを用いた蛍光タグの識別性能評価 |
| 3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Ryo Watanabe, Jun Tanida |
| 2. 発表標題 Image-based communication for IoT devices using digital optical coding |
| 3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2021 (ISOM'21) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Ryo Watanabe and Jun Tanida |
| 2. 発表標題 Application of digital optical coding to IoT device communication |
| 3. 学会等名 Information Photonics 2020 (IP2020) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Jun Tanida and Ryoichi Horisaki |
| 2. 発表標題 Two Approaches toward Imaging through Scattering Media |
| 3. 学会等名 The 4th International Conference on Photonics and Optical Engineering (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Ryoichi Horisaki and Jun Tanida |
| 2. 発表標題 Three-dimensional speckle correlation imaging |
| 3. 学会等名 JSAP-OSA Joint Symposia 2020 (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 谷田 純 |
| 2. 発表標題 光センシング・イメージングの新展開 |
| 3. 学会等名 第53回光学四学会関西支部連合講演会（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 谷田 純 |
| 2. 発表標題 コンピュータショナルセンシング・イメージング |
| 3. 学会等名 第1回光×Computingワークショップ（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-------------------------------|
| 1. 発表者名 山崎 薫，堀崎 遼一，谷田 純 |
| 2. 発表標題 半教師あり学習による散乱イメージング |
| 3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田理己，小倉裕介，西村隆宏，玉田洋介，村田隆，谷田純 |
| 2. 発表標題 サブ回折限界照明顕微法における奥行き方向分解能の評価 |
| 3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-----------|--|--|----|
| 研究 分担者 | 小倉 裕介 (Ogura Yusuke) (20346191) | 大阪大学・情報科学研究科・准教授 (14401) | |
| 研究 分担者 | 堀崎 遼一 (Horisaki Ryoich) (20598958) | 東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授 (12601) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|